

DESCRIPCIÓN DE UNA NUEVA UNIDAD DE LAVAS DENOMINADA ANDESITAS BASÁLTICAS DE EL MORITO - CORRELACIÓN REGIONAL CON EVENTOS MAGMÁTICOS DE ARCO

Gabriel Rodríguez¹; Gilberto Zapata¹

Forma de citar: Rodríguez, G., y Zapata, G. 2014. Descripción de una nueva unidad de lavas denominada Andesitas basálticas de El Morito – correlación regional con eventos magmáticos de arco. Boletín de Geología, 36(1): 85-102.

RESUMEN

La unidad Andesitas basálticas de El Morito aflora en la zona de convergencia del basamento oceánico de la Cordillera Occidental y el basamento continental de la Cordillera Central, junto a la Formación Combia; está constituida por basaltos y andesitas basálticas con textura porfírica, tiene fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno principalmente y ocasionalmente olivino y ortopiroxeno que flotan en una matriz microcristalina con textura fluidal a pilotaxítica; corresponden a lavas de series shoshoníticas con valores más altos en K_2O , Na_2O , P_2O_5 y valores mayores en los elementos de tierras raras livianas Rb, Ba, Th, U, K, La, Ce, Pr, Sr, P, Nd, Zr, Sm y Eu y menores en Ti, Y, Yb y Dy, que las lavas calcoalcalinas de la Formación Combia. La edad de las unidades del Arco de El Botón de afinidad shoshonítica corresponden al rango entre 9 y 12,5 Ma incluyendo las Andesitas basálticas de El Morito, mientras las edades de unidades que hacen parte de la Formación Combia están en el rango de 6 a 8,5 Ma.

Palabras Clave: Formación Combia, Andesitas basálticas de El Morito, lavas shoshoníticas

DESCRIPTION OF A NEW LAVA UNIT NAMED EL MORITO BASALTIC ANDESITE - REGIONAL CORRELATION WITH ARCH MAGMATIC EVENTS.

ABSTRACT

El Morito basaltic Andesite unit outcrops in the converging zone of the oceanic basement of the western cordillera and the continental basement of the central mountain range, beside the Combia Formation. It is formed by basalt and basaltic andesite with porphyritic texture, it has phenocrysts of plagioclase and clinopyroxene mainly, and occasionally olivine and orthopyroxene that float on a microcrystalline matrix with a fluidal texture to phylotaxis; they correspond to shoshonitic magma series with highest values in K_2O , Na_2O , P_2O_5 and major values in the elements Rb, Ba, Th, U, K, La, Ce, Pr, Sr, P, Nd, Zr, Sm and Eu and minor values in Ti, Y, Yb and Dy, than the calc-alkaline magmas of the Combia Formation. The age of the units of the Arco de El Botón which has shoshonitic affinity, corresponds to a range between 9 and 12.5 Ma, including the basaltic andesite of El Morito, while the ages of the units belonging to the Combia Formation are located in the range from 6 to 8.5 Ma.

Keywords: Combia Formation, El Morito Basaltic Andesites unit, shoshonitic lavas

¹ Servicio Geológico Colombiano - GTR, Calle 75 N° 79^a-51, Medellín, teléfono 2644949 ext 8107. grodriiguez@sgc.gov.co, gzapata@sgc.gov.co

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se hace una caracterización petrográfica y geoquímica de una nueva unidad de lavas, la cual se propone separar de la Formación Combia y denominarla Andesitas basálticas de El Morito. Se muestra la distribución de datos geocronológicos publicados y datos geoquímicos nuevos que sugieren que la unidad propuesta corresponde a un evento magmático que podría relacionarse con el magmatismo del Arco de El Botón definido por Zapata y Rodríguez (2011) y Rodríguez y Zapata (2012), además, se comparan la geoquímica y edades de la nueva unidad con los Basaltos de El Botón (Zapata y Rodríguez, 2011), con datos de lavas de la Formación Combia y con cuerpos plutónicos de afinidad shoshonítica que afloran en la Cordillera Occidental, de tal manera que se pueda visualizar las diferencias y similitudes entre unidades de rocas ígneas del Mioceno que afloran en el noroccidente de Los Andes.

La información petrográfica y geoquímica presentada en este trabajo junto con el análisis de los datos geocronológicos publicados, pretende aportar nuevas ideas e información acerca de la evolución magmática del norte de Los Andes de Colombia durante el Mioceno tardío. Además, se plantea un marco geológico regional que muestra los diferentes arcos magmáticos que afloran en el noroccidente de Los Andes y los diferentes bloques geológicos regionales, para poder entender el contexto geológico del magmatismo que generó las Andesitas basálticas de El Morito.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El área de interés en el presente estudio está comprendida entre el flanco occidental de la Cordillera Central y el norte de la Cordillera Occidental en los departamentos de Antioquia, Caldas y Risaralda, donde cada una de las cordilleras presenta características geológicas y estructurales contrastantes. La geología regional muestra en el área un mosaico de bloques, que en la Cordillera Occidental está conformado por rocas oceánicas de naturaleza basáltica toleítica que hacen parte del bloque Cañasgordas y un bloque más occidental conformado por el Arco Chocó - Panamá de afinidad calcoalcalina. La Cordillera Central está conformada por rocas metamórficas de los complejos Arquía y Cajamarca que conforman su basamento (FIGURA 1).

En el sector norte de la Cordillera Occidental y en la zona de sutura entre el basamento continental de la Cordillera Central y el basamento oceánico de la Cordillera Occidental, afloran unidades que hacen parte de los arcos magmáticos de Barroso – Sabanalarga

(Rodríguez *et al.*, 2012), Chocó - Panamá y El Botón (Zapata y Rodríguez, 2011; Rodríguez y Zapata, 2012; Rodríguez *et al.*, 2012; Rodríguez y Arango, 2013 y Rodríguez y Zapata, 2013), (FIGURA 1A).

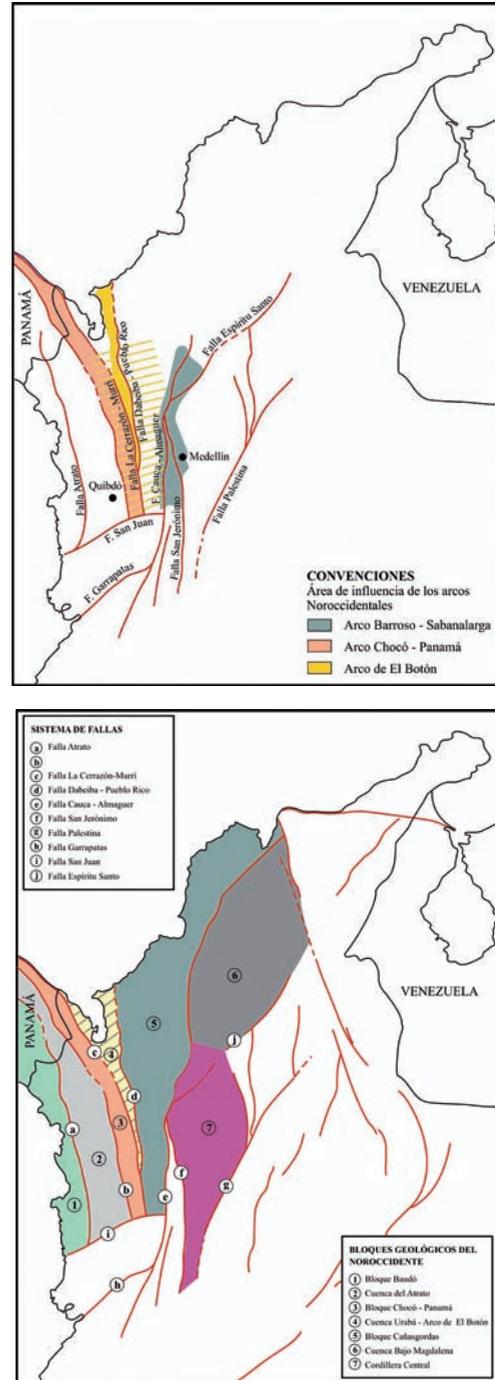


FIGURA 1. A) Área de influencia de los tres arcos más noroccidentales de Los Andes de Colombia al norte de la Falla San Juan, incluyendo los productos volcánicos y los cuerpos plutónicos de cada arco. **B)** Bloques geológicos en el noroccidente de Los Andes de Colombia y fallas y sistemas de fallas que limitan los bloques.

Se compone de un conjunto de bloques litológicos y arcos magmáticos de variada naturaleza y edad; está conformado de este a oeste por los bloques Cañasgordas y Chocó – Panamá ó arco de Chocó - Panamá y sobre estos dos bloques y el basamento metamórfico de la Cordillera Central de Colombia se desarrollaron al menos dos arcos magmáticos: Arco Barroso – Sabanalarga (Rodríguez *et al.*, 2012) durante el Cretácico temprano – Cretácico tardío y el Arco de El Botón durante el Serravaliano – Tortonianiano (Zapata y Rodríguez, 2011) (FIGURA 1B).

El Bloque Cañasgordas comprende una variedad de unidades de naturaleza y edad diferentes: presenta un basamento de rocas diabásicas y basálticas almohadilladas de afinidad T-MORB formadas en el límite Jurásico – Cretácico (Diabasas de San José de Urama en el sentido de Rodríguez y Arango, 2013), el cual fue segmentado en bloques que se expresan como franjas de dirección NS, intercaladas con bloques tectónicos de chert, calizas, litoarenitas y lodolitas del Cretácico superior, denominados por Álvarez y González (1978) como miembros Nutibara y Urrao de la Formación Penderisco y renombradas por Rodríguez *et al.* (2010) como Chert y calizas de Nutibara y Litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (FIGURAS 1 y 2).

El Bloque Chocó – Panamá corresponde a un arco de islas de edad Eoceno temprano, constituido por una unidad volcánica de afinidad calcoalcalina (Complejo Santa Cecilia – La Equis (Calle y Salinas, 1986), un cuerpo plutónico central que corresponde a los batolitos de Mandé (Álvarez, 1971) y Acandí (Radelli, 1967) y cuerpos hipoabisales tardíos andesíticos y dacíticos; este bloque aflora al occidente de la Falla Dabeiba-Pueblo Rico (FIGURAS 1 y 2).

El Arco Barroso – Sabanalarga se desarrolló a finales del Cretácico temprano y principios del Cretácico tardío en un lapso de 30 Ma (Rodríguez y Arango, 2013); en su parte más occidental, dentro del Bloque Cañasgordas y específicamente sobre las Diabasas de San José de Urama en el sentido de Rodríguez y Arango (2013), se introdujo a lo largo de la sutura entre el basamento metamórfico de la Cordillera Central y el basamento oceánico de la Cordillera Occidental, que de acuerdo a Maya y González (1995), corresponde a la Falla Cauca – Almaguer y según Villagómez (2011) y Rodríguez y Arango (2013) corresponde a la Falla San Jerónimo. El arco está constituido en el norte de Los Andes por la Formación Barroso en el sentido de Rodríguez y Arango (2013), probablemente el Complejo Quebradagrande (Rodríguez y Zapata, 2013) y un conjunto de plutones que intruyen las dos cortezas, compuestos por una facies temprana básica diorítica-gabroide de afinidad toleítica

y una facies posterior intermedia tonalítica de afinidad calcoalcalina media en K, (FIGURAS 1 y 2).

El Arco de El Botón comprende al menos una unidad volcánica denominada Basaltos de El Botón (Zuluaga y Hoyos, 1978; Zapata y Rodríguez, 2011) que se formó a lo largo de la sutura entre el Bloque Cañasgordas y el Bloque Chocó – Panamá (Falla Dabeiba – Pueblo Rico); además, un conjunto de plutones dioríticos, monzodioríticos y monzoníticos que intruyeron los dos bloques y se caracteriza por presentar afinidad shoshonítica alta en K. Este arco tuvo una corta duración durante el límite Mioceno medio - Mioceno tardío (lapso de 3 Ma, entre 9 y 12.5 Ma) (Rodríguez y Zapata, 2012), y posiblemente alcanzó a llegar hasta la zona de sutura entre los basamentos oceánico y metamórfico, en la cuenca del río Cauca, pudiendo ser parte de este arco las Andesitas basálticas de El Morito que son el objeto de este trabajo (FIGURAS 1 y 2).

En este contexto de bloques de naturaleza y edades diferentes y arcos con características geoquímicas, litológicas y geocronológicas propias, se presenta a finales del Mioceno el vulcanismo de la Formación Combia en la zona de colisión entre el Bloque Cañasgordas y el basamento metamórfico de la Cordillera Central, unidad reconocida por Grosse (1926) con el nombre de «Estratos de Combia», posteriormente renombrada Formación Combia por González (1980), la cual se ha descrito como una unidad compuesta por dos miembros: uno volcánico y el otro sedimentario (González, 2001). El miembro volcánico según González (2001) se compone de derrames basálticos y andesíticos, aglomerados y brechas volcánicas, tobas y tufas; se ha considerado que se formó en el mismo terreno donde hoy aflora, con centros volcánicos que corresponden a cuerpos de pórfidos andesíticos y dacíticos (Grosse, 1926; González, 2001) y que los derrames lávicos se asocian a las rocas piroclásticas, a los cuerpos hipoabisales y a las sedimentitas continentales (Restrepo *et al.*, 1981, González, 2001; Leal, 2011).

MATERIAL Y MÉTODOS

Se analizaron nueve secciones delgadas de las Andesitas basálticas de El Morito, las cuales se clasificaron siguiendo las recomendaciones de la Subcommission on the Systematics of igneous Rocks editadas por Le Maitre (2002). Basados en los resultados de los análisis químicos de la Formación Combia y utilizando los diagramas de Le Bas (1986) y Peccerillo and Taylor (1976) se hizo la separación de los basaltos de afinidad alcalina de la serie shoshonítica de los basaltos de afinidad calcoalcalina afines a la serie subalcalina.

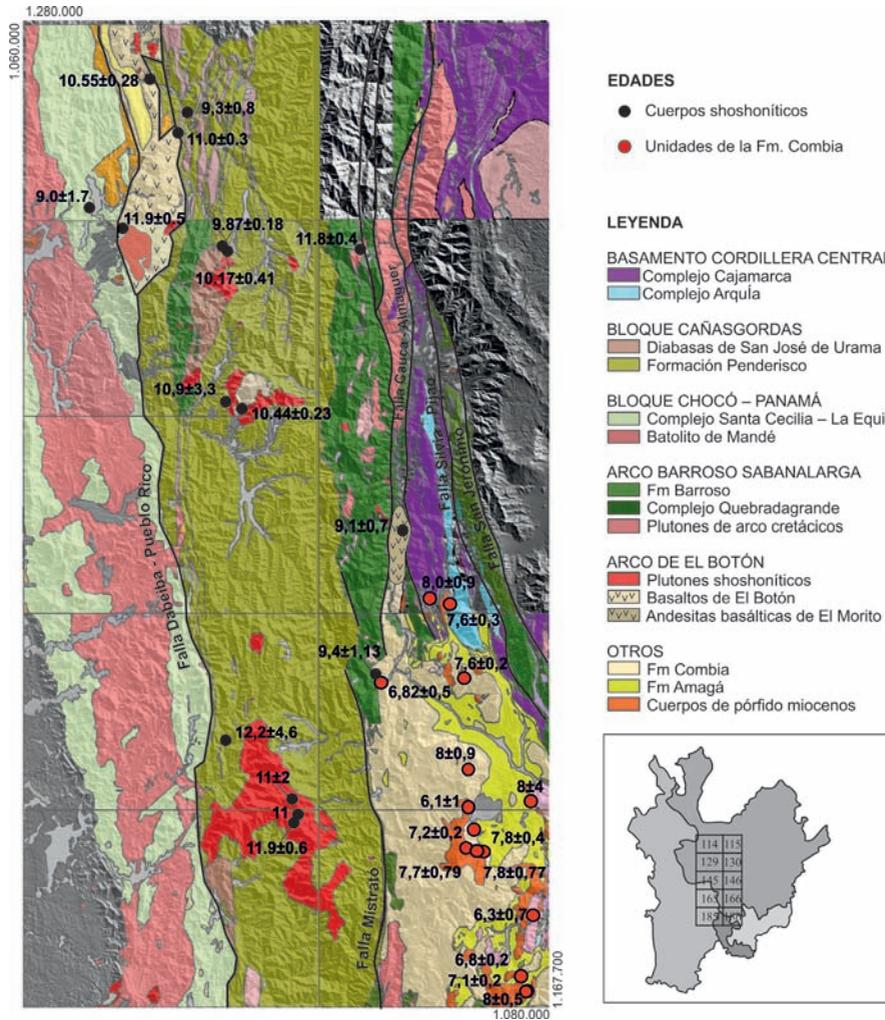


FIGURA 2. Marco geológico regional del norte de la Cordillera Occidental y la margen occidental de la Cordillera Central de Colombia. Se muestra la localización de las edades publicadas de cuerpos miocenos en este sector de Los Andes, en negro edades de cuerpos de afinidad shoshonítica y en rojo edades de cuerpos de afinidad toleítica – calcoalcalina (base geológica del Servicio Geológico Colombiano, modificada de los mapas a escala 1:100.000).

Los análisis litogeoquímicos de seis muestras de basaltos y andesitas de la unidad Andesitas basálticas de El Morito se hicieron en el laboratorio ActLabs de Canadá; estas rocas están relacionadas en el trabajo de Geoestudios-INGEOMINAS (2005). Catorce muestras se analizaron en el laboratorio ACME en el marco del proyecto Cauca – Romeral; para el análisis de las muestras se seleccionó el Grupo 4A-4B de laboratorios ACME (Canadá), el cual incluye un total de 55 elementos, distribuidos en 11 elementos mayores y menores (4A) y 44 elementos traza (4B). Para el análisis 4A, 0,2 g de muestra se funden en borato de litio (LiBO_2) y son digeridos en una solución de HNO_3 al 5%, para su posterior análisis por el método ICP-ES. Se incluyen análisis para carbono y azufre (TOT/C y TOT/S, analizados por la técnica analítica de LECO) y volátiles (LOI, perdida por ignición, referida como

la diferencia en peso después de calcinar la muestra a 1000°C), así como también valores para Ni y Sc. Para el análisis de elementos traza (tierras raras, elementos refractarios y metales base-preciosos), el grupo 4B contempla dos procedimientos. Para el análisis de tierras raras (REE) y elementos refractarios, una sub-muestra de 0,2 g se somete a un tratamiento similar al del grupo 4A (fusión con LiBO_2 y digestión en una solución de ácido nítrico al 5%), mientras que para metales base y preciosos, una sub-muestra de 0,5 g es digerida en una solución de agua regia ($3\text{HCl}:1\text{HNO}_3$) y analizada por ICP-MS.

Se hizo una revisión bibliográfica de trabajos relacionados con el magmatismo Mioceno en la Cordillera Occidental y cuenca del Cauca en Antioquia y Caldas. En especial aquellos con información geoquímica y geocronológica.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

Las litologías dominantes en la unidad Andesitas basálticas de El Morito son los basaltos augíticos y andesitas augíticas de color gris a verde oscuro con textura porfídica, constituida por fenocristales de tamaños entre 1 y 5 mm de plagioclasa y piroxeno, y amígdalas de color blanco flotantes en una matriz afanítica.

Los análisis petrográficos de nueve muestras de esta unidad, indican que los basaltos y andesitas tienen mayormente textura porfídica y glomero-porfídica, también se observaron algunas muestras con textura poiquilítica. Los fenocristales son de plagioclasa y augita y localmente en algunas muestras se presentan olivino y ortopiroxeno. La matriz es microcristalina con textura fluidal a pilotáxica y representa entre 43,8

y 74,8% de la roca (TABLA 1). Las rocas localmente tienen minerales alterados a epidota y clorita.

La plagioclasa se encuentra en fenocristales (15-52,5%) con tamaños entre 1-4 mm y como microcristales entre 150 y 500 μm en la matriz. Los fenocristales son subhedrales a euhedrales de formas tabulares con maclas de albita y albita-Carlsbad, ocasionalmente se presentan glomero-cristales, algunos con inclusiones de vidrio formando una textura en tamiz (*sieve*) con los bordes corroídos por la matriz. En las rocas basálticas la plagioclasa corresponde a labradorita con rango An64-68 y en las andesitas An48-50. Algunos cristales presentan zonación normal con el núcleo más cálcico que los bordes, presentan inclusiones de piroxeno, opacos y vidrio. Los microcristales de la matriz están entrecruzados con piroxeno intergranular (FIGURA 3D), o muestran orientación fluidal.

TABLA 1. Composición modal en porcentaje y clasificación de muestras de las Andesitas basálticas de El Morito.

COORDENADAS FENOCRISTALES MATRIZ											
MUESTRA	N	E	Pl	OI	Cpx	Opx	Vidrio	Cristales	Op	Otros	CLASIFICACIÓN
ER-135 R	1169830	1136806	30.1		TR	TR	-	69.3	2.2	Ep 1.7	Andesita basáltica
ER-334 R	1173538	1134340	29.2	-	14.6	3,9	7.5	36.3	8.1	-	Basalto augítico con Opx
LM-113 R	1170926	1137537	25	-	7	-	22	40	3	Chl 3	Basalto
LM-305 R	1173046	1135822	15	2	2	-	-	80	1		Basalto augítico
MR-124 R	1178852	1137212	23	-	2	-	8	59	1	Cc 6	Andesita augítica
MR-125 R	1178812	1137507	16.1	-	9.1	-	-	74.8	-	-	Basalto augítico
900630	1174610	1136576	52.5	-	25	-	7	-	3	12.5	Basalto augítico
900637	1174610	1136576	22.7	2.1	4.2	-	-	68.8	1.4	-	Basalto porfídico
900638	1162392	1134462	20.8	3.2	14.3	-	-	60.4	1.3	-	Basalto porfídico

La augita ocurre como fenocristales subhedrales a euhedrales (2-25%) de color verde pálido y clivaje poco marcado formando glomérulos. En la matriz está como microcristal, esporádicamente presenta inclusiones de olivino, apatito y opacos; en general el tamaño varía entre 0,1 mm y 2,0 mm.

El ortopiroxeno sólo se encontró en dos muestras (ER-135R y ER-334R), en fenocristales euhedrales de menor tamaño que los clinopiroxenos, con un pleocroísmo que varía de verde pálido a rosado pálido, con extinción paralela al clivaje y asociado con óxidos de hierro y titanio.

El olivino (2-3,2%) se presenta en fenocristales de menor tamaño que los de piroxeno y plagioclasa, en algunas rocas como esqueletos de cristales euhedrales alterados y reemplazados por carbonatos, serpentina e

iddingsita con magnetita residual en las fracturas. En la matriz ocurre como microcristales alterados a iddingsita de color verde pardo.

Como minerales accesorios se encuentran opacos, como inclusiones en el piroxeno y olivino o dispersos en la matriz (1-8,1%) y apatito en cristales aciculares incluidos en la plagioclasa.

La matriz está constituida por microlitos de plagioclasa, piroxeno, olivino y opacos, localmente presenta vidrio desvitrificado de color marrón. Se observa alteración de los piroxenos a clorita y esmectita, y de la plagioclasa a sericita. Las amígdalas son subsféricas a irregulares rellenas por clorita y calcita. En la pasta de las andesitas se observan, además, trazas de microcristales de cuarzo, hornblenda, biotita y sanidina.

GEOQUÍMICA

Tejada *et al.* (2007) hicieron una caracterización petrográfica y química de las rocas de la Formación Combia entre los municipios de Jericó y Pueblo Rico y un sector del municipio de Jardín en el departamento de Antioquia, subdividiendo el cuerpo en ocho (8) sub-unidades con diferencias litológicas, encontrando que las lavas de la Formación Combia corresponden geoquímicamente a andesitas y andesitas basálticas con contenido medio de K_2O y tendencia toleítica y calcoalcalina, concordando con los resultados químicos de Leal (2011), López *et al.* (2006), Marriner and Millward (1984) y Jaramillo (1976). Leal (2011) encuentra en el área de Quebradona, municipio de Jericó, dos muestras con afinidad shoshonítica las cuales interpreta como una posible alteración hidrotermal que subió el contenido de K. En este contexto de lavas y cuerpos porfíricos de afinidad toleítica - calcoalcalina y shoshonítica, cabe la pregunta: ¿corresponden al mismo evento magmático y tienen la misma edad las

rocas de la serie toleítica- calcoalcalina y las de la serie shoshonítica?. La respuesta se discutirá a lo largo de este trabajo, abriendo una nueva interpretación para el magmatismo que agrupa la Formación Combia y permitiendo separar las Andesitas basálticas de El Morito.

La caracterización geoquímica de la unidad Andesitas basálticas de El Morito se hace a partir de seis (6) muestras de lavas; se compara con los resultados de catorce (14) muestras de la Formación Combia (FIGURA 4) y con los datos publicados por Zapata y Rodríguez (2011) de la unidad Basaltos de El Botón; además, se tienen en cuenta los resultados de Leal (2011), Tejada *et al.* (2007), López *et al.* (2006), Marriner and Millward (1984) y Jaramillo (1976) para la Formación Combia. Los resultados de óxidos mayores se presentan en la TABLA 2 y los elementos trazas y tierras raras en la TABLA 3. Los datos de óxidos mayores han sido recalculados al 100% corrigiendo la pérdida por ignición (LOI) para los gráficos.

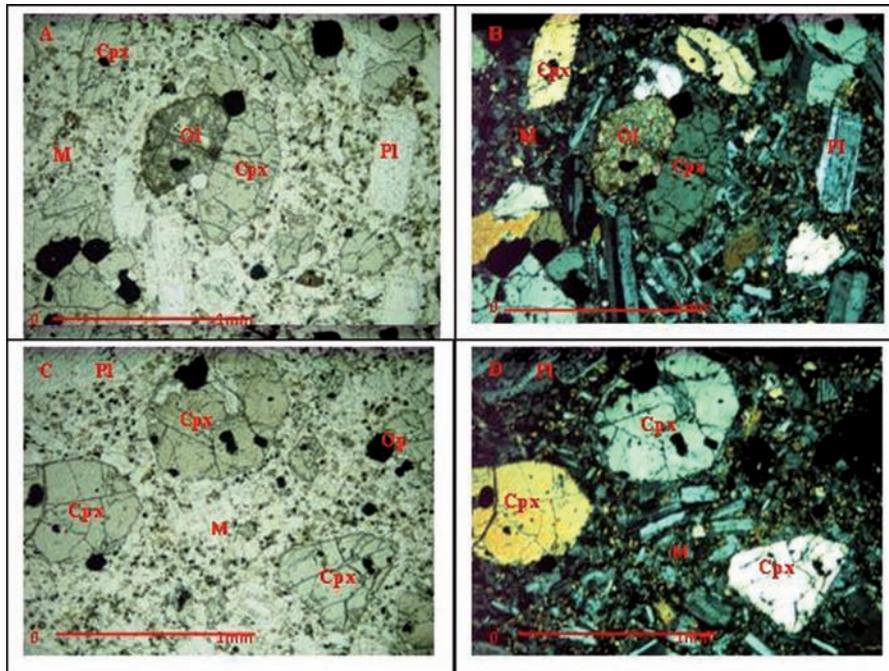


FIGURA 3. Andesitas basálticas de El Morito **A)** IGM-900637. Basalto porfírico. Nícoles paralelos, fenocristales de plagioclasa (Pl), clinopiroxeno (Cpx), olivino (Ol) y opaco (Op) flotando en matriz microcristalina (M). **B)** IGM-900637- con nícoles cruzados. **C)** IGM-900638. Basalto porfírico. Nícoles cruzados. Fenocristales euhedrales de plagioclasa (Pl) y clinopiroxeno (Cpx) con inclusiones de opacos (Op) flotando en matriz hialocristalina (M). **D)** IGM-900638 con nícoles cruzados. En la matriz microcristales de plagioclasa con piroxeno intergranular

Los contenidos de SiO_2 de lavas de la Formación Combia varían entre 50% y 59% correspondientes a basaltos, andesitas basálticas y andesitas, con la muestra AP-1534R de 63.4% de SiO_2 que corresponde a una dacita. El contenido de SiO_2 en lavas de la unidad Andesitas

basálticas de El Morito varía entre 49,96 % y 54,3% y corresponden a basaltos y andesitas basálticas, mientras en los Basaltos de El Botón varía entre 46,9% y 55,6%, ubicándose la mayoría de las muestras dentro del campo de los basaltos y en menor proporción en las andesitas

basálticas. Los contenidos de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , TiO_2 , MnO , Cr_2O_3 son similares en todas las muestras, las diferencias se presentan en los contenidos de Na_2O , K_2O y P_2O_5 , con valores más altos para las rocas alcalinas de series shoshoníticas (muestras ER135R, ER334R, LM113R, LM305R, MR124R, MU125R y muestras del Basalto de El Botón), que para las demás rocas de series calcoalcalinas de la Formación Combia. El Na_2O en las rocas de la unidad Andesitas basálticas de El Morito varía entre 3,06% y 3,9%, mientras en muestras de lavas de la Formación Combia varían entre 2,7% y 3,4%; el K_2O para las lavas de la unidad Andesitas basálticas de El Morito está entre 3,6% y 4,75%, en la Formación Combia varía entre 0.8% y 3%, el P_2O_5 en las rocas shoshoníticas varía de 0.46% a 0.68% y en las calcoalcalinas de 0,11% a 0,46%. Al comparar los contenidos de álcalis ($Na_2O + K_2O$) y la relación K_2O/Na_2O , se observa que las lavas de la unidad Andesitas basálticas de El Morito y Basaltos de El Botón presentan $Na_2O+K_2O > 6,6\%$, mientras las de la Formación Combia presentan valores entre 3,5% y 6,6%. Las lavas de la unidad Andesitas basálticas de El Morito y Basaltos de El Botón presentan relación $K_2O/Na_2O > 1\%$ mientras que para lavas de la Formación Combia esta relación es menor a 1%. Resultados similares fueron obtenidos por Tejada *et al.* (2007) y Leal (2011) para la Formación Combia.

El diagrama TAS (Le Bas *et al.*, 1986) (FIGURA 5) discrimina las muestras de lavas en dos series: alcalina y subalcalina. Seis (6) muestras de la unidad Andesitas basálticas de El Morito y nueve (9) muestras del Basalto de El Botón corresponden a la serie alcalina que grafica en los campos de traquibasaltos, traquiandesitas basálticas y traquiandesitas. Mientras que catorce (14) muestras de la Formación Combia y cuatro (4) del Basalto de El Botón son subalcalinas y están en los campos de los basaltos, andesitas basálticas, andesitas y dacitas, con el mayor número de muestras en los campos de andesitas basálticas y andesitas, con enriquecimiento de álcalis para las dos series a medida que aumenta el SiO_2 . Se pueden separar las muestras en dos series: se agrupan en las rocas alcalinas las muestras de las Andesitas basálticas de El Morito y los Basaltos de El Botón cayendo las dos muestras más básicas en la serie subalcalina, explicable dentro de una tendencia normal de diferenciación que pasa de subalcalino en las facies básicas a alcalino en las más diferenciadas y en las rocas subalcalinas las lavas de la Formación Combia, y dos muestras de los Basaltos de El Botón que están por fuera de la tendencia normal de la unidad (FIGURA 5).

En el diagrama de Peccerillo and Taylor (1976) (FIGURA 6), las muestras alcalinas de la unidad

Andesitas basálticas de El Morito y el Basalto de El Botón se ubican dentro de la serie shoshonítica y las rocas subalcalinas de la Formación Combia se grafican en el campo de las series calcoalcalinas medias y altas en K. Las lavas subalcalinas de la serie calcoalcalina con contenidos de $SiO_2 < 53\%$ y menos diferenciadas, se grafican dentro del campo de rocas calcoalcalinas medias en K, mientras las lavas con contenidos de $SiO_2 > 53\%$ se grafican en su mayoría dentro de la serie calcoalcalina alta en K. Las rocas shoshoníticas muestran un enriquecimiento alto en K_2O a medida que aumenta el contenido de SiO_2 ; se representan las dos poblaciones de lavas en el gráfico.

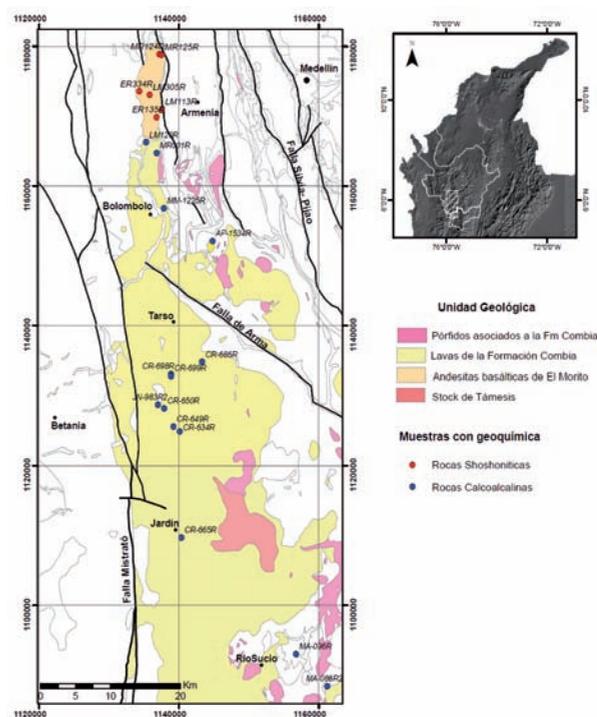


FIGURA 4. Localización de la Formación Combia, las Andesitas basálticas de El Morito localización de muestras de litogeoquímica de ambas unidades.

En la TABLA 3 se muestra la composición química de elementos traza y tierras raras. Todas las lavas, en general, se encuentran enriquecidas en tierras raras livianas (LREE) con un patrón homogéneo que se va empobreciendo progresivamente hacia los elementos más pesados (HREE). Las muestras de la unidad Andesitas basálticas de El Morito y los Basaltos de El Botón de afinidad shoshonítica tienen mayor enriquecimiento en LREE (La, Ce, Pr, Sm) y en elementos tales como Nb, Cd, Pr y Eu que las muestras de la Formación Combia de afinidad calcoalcalina. En HREE los contenidos son comparables, siendo ligeramente más empobrecidas las lavas shoshoníticas

(FIGURA 7A). Ambas series presentan pendiente negativa con mayor enriquecimiento en LREE para las rocas más ricas en K_2O , comportamiento que es normal en rocas generadas en arcos. La muestra AP-1534R clasificada como dacita presenta valores muy altos de La, Ce, Pr y Nd.

En general se presentan mayores concentraciones de tierras raras ligeras (LREE) con respecto a las pesadas (HREE), como se observa en las relaciones La/Sm que varía para las lavas de la Formación Combia entre 2,16

a 4 y para las shoshoníticas de la Andesita basáltica de El Morito entre 3,5 y 5,5; la relación La/Yb para rocas calcoalcalinas de la Formación Combia es del orden de 3,1 a 6,7 y para rocas de la unidad Andesitas basálticas de El Morito de afinidad shoshonítica es de 10,4 a 12,7. La relación Ba/Nb es de 126,1 a 384,14 para rocas calcoalcalinas y para las shoshoníticas de 233 a 301,8; valores que sugieren la participación de un componente de subducción en las génesis magmática. Los valores de la relación LREE /HREE, muestran las diferencias entre las unidades de cada una de las series.

TABLA 2. Resultados analíticos para óxidos mayores (% wt) en lavas de la Formación Combia, Andesitas basálticas de El Morito y Basaltos de El Botón.

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	LOI	SUM
FORMACIÓN COMBIA													
AP-1534R	63,4	16,9	4,78	0,65	4,44	3,69	2,9	0,3	0,11	0,16	0,01	1,9	99,2
CR-634R	58	16,4	8,35	1,47	5,42	3,42	2,88	0,73	0,46	0,19	0,01	2,5	99,8
CR-649R	58,8	15,8	8,06	1,47	4,85	3,47	2,99	0,72	0,45	0,2	0,01	2,9	99,7
CR-650R	52,6	17,6	10,2	3,27	8,26	2,73	1,22	0,9	0,23	0,2	0,01	2,7	99,9
CR-665R	51,1	16,5	12,1	3,9	8,75	2,87	1,17	1	0,37	0,17	0,01	1,9	99,9
CR-686R	50,8	18,9	10,8	3,31	9,77	2,75	1,17	0,83	0,25	0,17	0,01	1,2	99,9
CR-698R	51,9	19,1	11,1	3,37	8,22	2,58	0,94	0,96	0,29	0,18	0	1,2	99,9
CR-699R	50,3	16,8	10,8	3,27	10,1	2,27	1,28	1	0,27	0,22	0,01	3,5	99,9
JN-983R2	53	18,1	9,24	2,91	8,2	3,07	2,05	0,76	0,38	0,18	0,01	2	99,8
MA-086R2	55,3	16	8,9	3,36	7,44	2,82	1,03	0,79	0,22	0,13	0,01	4	99,9
MA-096R	50,4	16,8	12,2	4,31	9,4	2,7	0,8	0,85	0,3	0,19	0,01	2	99,9
MM-1225R	57,8	17,3	6,73	1,64	6,98	2,93	2,33	0,62	0,3	0,14	0,01	2,8	99,7
LM120R	56,2	17,6	8,97	2,84	7,18	2,77	2,27	0,73	0,27	0,18	0	0,7	99,8
MR001R	54,3	17,3	9,81	3,56	7,48	2,76	2,11	0,82	0,35	0,16	0	1	99,7
ANDESITAS BASÁLTICAS DE EL MORITO													
ER135R*	54,3	20	5,95	1,94	5,89	3,69	4,36	0,51	0,46	0,11	0	2,4	99,6
ER334R*	50,7	16,6	9,17	4,02	7,44	3,22	3,88	0,71	0,6	0,16	0,01	3,3	99,8
LM113R*	52,1	18,4	8,42	3,12	6,72	3,36	4,46	0,66	0,58	0,15	0	1,7	99,6
LM305R*	53,6	20,2	6,19	1,82	6,14	3,9	4,75	0,52	0,45	0,13	0	1,9	99,6
MR124R*	53,8	18,8	7,5	1,93	6,24	3,88	4,47	0,68	0,56	0,15	0	1,7	99,6
MR125R*	50	17,9	9,56	4,17	8	3,06	3,6	0,75	0,68	0,2	0	1,8	99,6
BASALTOS DE EL BOTÓN													
7103	51,5	15,9	9,97	5,12	10,6	2,49	1,03	0,67	0,25	0,15	0	2,16	100
7106	55,6	18,2	7,29	2,8	6,71	3,56	1,75	0,65	0,25	0,1	0	3,17	101
700001	47,1	11,8	11,4	10,2	11,5	1,59	1,85	0,62	0,42	0,18	0	3,76	98,8
706401	50	16,8	8,89	4,13	7,01	3,34	4,48	0,62	0,68	0,18	0	3,87	100
706402	53	18,3	6,25	2,43	3,98	4,44	5,66	0,53	0,64	0,13	0	4,32	99,6
706403	48,7	20	6,85	2,24	7,13	4,25	2,8	0,48	0,56	0,18	0	5,15	100
706404	48,5	17,2	9,26	4,75	7,9	4,31	2,2	1,09	1,04	0,24	0	3,75	100
706405	50,2	16,3	10,9	4,63	9,04	3,26	2,82	0,86	0,5	0,23	0	1,88	99,7
706406	51	16	9,18	3,09	8,93	2,48	3,09	0,85	0,46	0,2	0	3,57	98,4
706407	50	14	11,7	5,42	9,31	3,79	1,74	0,98	0,57	0,17	0	2,47	101
706408	51,9	16,2	10,1	3,69	7,79	2,9	4,3	0,92	0,66	0,15	0	1,03	99,9
706413	46,9	16,1	12,2	6,76	9,46	1,91	1,3	1,06	0,22	0,18	0	3,82	99,9
706466	48,3	14,7	10,5	5,44	9,66	5,38	0,78	0,88	0,81	0,19	0	3,33	100

TABLA 3. Análisis químicos de elementos traza y tierras raras en ppm, en muestras de la Formación Combia, Andesitas basálticas de El Morrito y Basaltos de El Botón (Zapata y Rodríguez, 2011).

Muestra	Ba	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sr	Ta	Th	U	V	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Pb	Ni		
FORMACIÓN COMBIA																															
AP-1534R	4057	1,4	19,3	3,6	7,8	73,5	838	0,7	4,3	2,3	26	127	24,8	27,8	38,5	51,9	18,6	3,7	1,12	3,56	0,61	3,59	0,73	2,35	0,39	2,59	0,46	3,4	7,1		
CR-634R	1127	2,2	18,1	3,1	4,9	60	510	0,4	2,4	1,2	74	89,9	29,8	11,7	24,6	3,43	15,3	4,1	1,37	5,13	0,86	5,04	1,03	3,12	0,44	2,85	0,45	0,7	1,5		
CR-649R	1178	2,5	17,9	3	5,1	64,6	481	0,4	2,2	1,3	57	96,5	31,9	12,5	25,4	3,61	15,7	4,4	1,39	5,33	0,93	5,56	1,06	3,26	0,48	2,95	0,48	1,2	3,2		
CR-650R	782	0,8	18,8	2	3,5	25,8	556	0,2	0,9	0,8	256	56,4	21	6,1	13,5	1,99	9,2	2,7	1,04	3,44	0,62	3,67	0,77	2,23	0,34	1,97	0,34	1,6	11		
CR-665R	770	2,7	19,4	1,9	2,9	30,4	498	0,2	1,2	0,6	301	55,7	22,2	7,4	15,7	2,34	10,1	2,9	1,16	3,73	0,64	3,77	0,75	2,32	0,35	2,01	0,32	1,2	13		
CR-686R	559	1	19,9	1,6	2	23,4	532	0,1	0,8	0,4	290	43,1	19,1	5,4	11,7	1,73	8,2	2,5	0,85	2,99	0,53	3,31	0,65	1,93	0,3	1,73	0,26	1,1	9,4		
CR-698R	679	0,5	20,7	1,9	3,8	17,9	454	0,2	0,7	0,5	242	54,8	22,8	7,1	14,9	2,38	10,3	3,1	0,95	3,57	0,68	3,86	0,78	2,36	0,35	2,25	0,35	1,5	1,2		
CR-699R	776	1	17,8	1,8	3,1	25,7	486	0,2	0,9	0,6	317	53,9	21,5	6,8	14	2,12	9,3	2,8	0,92	3,36	0,63	3,75	0,71	2,14	0,32	1,94	0,29	1,2	12		
JN-983R2	933	1,1	19,1	1,7	3,3	42,7	637	0,2	1	0,6	195	55,4	20,8	8,6	17,5	2,54	11,5	2,9	0,88	3	0,56	3,41	0,68	2,04	0,32	2,1	0,31	0,8	4		
MA-086R2	530	0,8	19,6	2,5	4,2	26,1	330	0,3	2	0,8	200	82,5	21,4	9,3	19,4	2,57	11,5	3,2	1,01	3,25	0,58	3,56	0,73	2,06	0,3	1,93	0,27	0,9	3,5		
MA-096R	584	1,1	18,4	1,5	1,9	20,7	502	0,1	0,8	0,5	312	43,7	20,2	5,6	12	1,75	8,5	2,5	0,92	3,06	0,59	3,38	0,69	1,99	0,31	2,14	0,29	1,4	22		
MM-1225R	1997	1	19,5	2,5	5,2	51,5	786	0,4	3,1	1,5	104	91,4	19,9	14	26,1	3,67	16,6	3,5	1,09	3,5	0,57	3,44	0,65	1,94	0,32	2,1	0,31	1,3	5,4		
LM120R	1479	2,2	16,8	2,6	4,1	58,1	510	0,3	2,7	1,3	183	81,1	22,9	11,5	23,6	3,12	14,1	3,5	0,89	3,57	0,62	3,7	0,72	2,27	0,36	2,24	0,34	0,9	1,9		
MR001R	1047	1,4	17,8	2,7	3,7	52	541	0,3	2,4	1	218	76,8	20,9	10,8	22,5	2,88	12,5	3,4	1,06	3,72	0,59	3,5	0,7	2,15	0,33	2,09	0,3	1,9	4,3		
ANDESITAS BASÁLTICAS DE EL MORITO																															
ER135R	1201	3,7	19,1	3	4,9	98,9	1309	0,3	4	2,3	122	99,2	16,8	22,5	41,5	5,2	20,8	4,1	1,26	3,44	0,53	2,83	0,53	1,68	0,29	1,76	0,26	1,2	2,5		
ER334R	976	2,3	19,2	2,7	4	105	968	0,2	3,7	2	228	81,9	19,5	21,5	40,5	5,48	22,6	4,8	1,51	4,36	0,67	3,42	0,6	1,74	0,32	1,87	0,29	1,9	9,4		
LM113R	995	0,6	17,4	3,1	4,2	83,3	1011	0,3	4,8	2,2	176	93,4	18,9	20,2	40,7	5,21	21,6	5	1,42	4,32	0,64	3,56	0,65	2,08	0,29	1,78	0,25	0,7	2,6		
LM305R	1099	3,3	19,1	3,3	4,7	125	1238	0,3	3,9	2,3	102	99,6	17,4	21,5	42,4	4,99	20,3	4,2	1,32	3,61	0,48	3,06	0,54	1,68	0,25	1,64	0,26	3,6	3,9		
MR124R	1231	1,2	19,4	2,8	4,2	101	1092	0,3	5	2	143	92,6	20,9	24	48,6	5,73	25,4	5,2	1,55	4,44	0,66	3,84	0,75	2,19	0,33	1,98	0,33	1,5	3,6		
MR125R	875	0,8	18,3	2,5	2,9	77,5	1106	0,2	4,1	1,5	232	73	19,5	19,9	43,4	5,3	24,7	5,7	1,6	4,8	0,67	3,54	0,69	1,94	0,27	1,91	0,26	3,5	6,5		
BASALTOS DE EL BOTÓN																															
706404	1431	7,5	19	2,9	6,4	21	1572	0,4	3,5	1,4	402	98	24,4	33,2	65,2	8,8	33,4	7,2	2,27	7,03	1	5,06	0,84	2,27	0,32	1,87	0,28	7	<20		
706405	427	0,9	17	2,1	3,5	75	904	0,2	1,3	0,8	296	70	23	13	26,2	3,51	14,5	3,8	1,34	4,51	0,76	4,29	0,81	2,36	0,34	2,16	0,34	<5	<20		
706406	692	0,6	16	2,1	4,1	74	843	0,3	1,4	0,7	250	72	21,8	12,1	24,6	3,31	13,5	3,4	1,19	4,1	0,72	4	0,77	2,21	0,33	2,13	0,33	<5	<20		
706407	494	0,2	15	2	3,1	33	914	0,2	1,2	0,5	361	69	21,9	12,2	25,2	3,53	14,8	3,9	1,3	4,27	0,73	4,13	0,76	2,18	0,31	1,97	0,31	<5	<20		
706408	1303	0,4	19	2,4	4,6	92	1153	0,3	1,4	0,8	288	81	24,9	15,7	30,6	4,32	17,7	4,3	1,46	5,21	0,85	4,58	0,84	2,46	0,36	2,25	0,34	5	<20		
706466	823	11	17	2,1	4,9	29	1422	0,3	3,2	1,5	419	76	18,1	20,6	39,2	5,11	19,2	4,4	1,38	4,04	0,64	3,35	0,59	1,65	0,24	1,49	0,22	7	<20		
706401	1105	1,6	15	1,8	2,8	84	1116	0,2	2,1	1,2	236	70	15,8	17,6	29,5	3,6	14,7	3,4	1,21	2,97	0,48	2,67	0,53	1,52	0,23	1,52	0,22	6	<20		
706402	1824	1,9	15	2	5,2	98	1415	0,3	3,7	1,7	173	90	12,8	24,6	36,8	4,1	14,9	2,9	1	2,27	0,37	2,17	0,42	1,25	0,19	1,24	0,19	9	<20		
706403	686	1,4	18	1,7	2,6	56	1361	0,1	1,9	0,9	141	58	16,2	15,4	29,1	3,88	14,5	3,2	1,18	3,65	0,54	2,99	0,56	1,62	0,25	1,56	0,24	5	<20		

en Ba, Sr, Pb y K, una marcada anomalía negativa de Nb con relación al Th y Ce, valores que caracterizan las rocas que han sido generadas en ambientes de subducción relacionadas a arcos magmáticos.

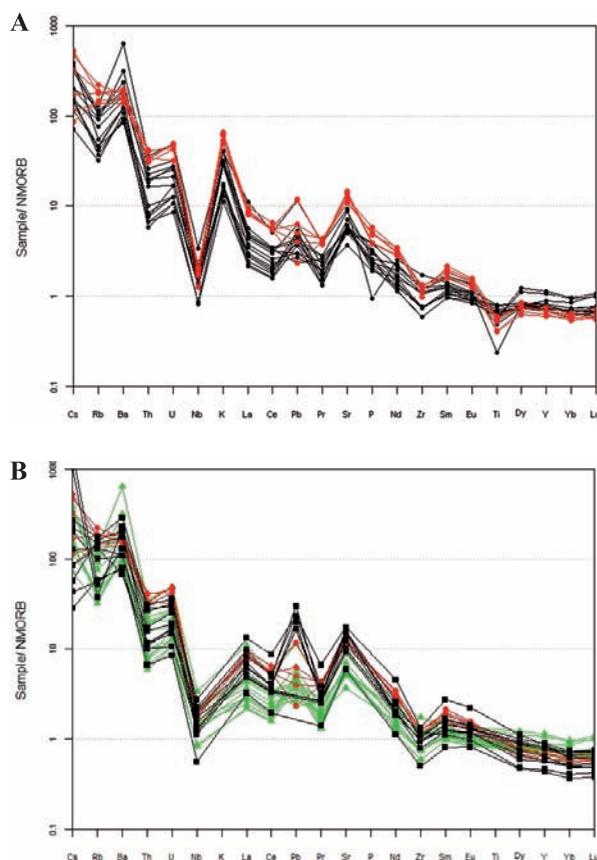


FIGURA 8. Diagramas multielementales normalizados respecto al N-MORB (Sun and McDonough, 1989). **A)** Diagrama multielemental comparando lavas de la unidad Andesitas basálticas de El Morito (rojo) y lavas de la Formación Combia (negro). **B)** Comparación entre lavas de El Botón (negro), lavas de la unidad Andesitas basálticas de El Morito (rojo) y lavas de la Formación Combia (verde).

Los valores de Nb y Zr presentan ligeramente mayores concentraciones con relación al N-MORB, mientras que Ti e Y tienen, en general, una abundancia algo menor que el N-MORB, característica propia de basaltos de arco volcánico calcoalcalinos y calcoalcalinos altos en K (Pearce, 1996), lo que concuerda con los resultados de los óxidos mayores sugiriendo que las lavas son calcoalcalinas y shoshoníticas.

La FIGURA 8B compara los patrones de comportamiento de los elementos traza para las lavas shoshoníticas de la unidad Andesitas basálticas de El Morito y Basaltos de El Botón de Zapata y Rodríguez (2011), con lavas de la Formación Combia. Las rocas de los Basaltos de

El Botón y de las Andesitas basálticas de El Morito muestran un patrón de comportamiento similar que sugiere un probable origen a partir del mismo arco, con una leve diferencia en el contenido de Pb. Con relación al tren de lavas de la Formación Combia que tienen menores contenidos de La, K, Ce, Pb, Pr, Sr, Nd, Sm, Zr y valores ligeramente mayores en los elementos más inmóviles Y, Yb y Lu que las lavas de los Basaltos de El Botón y las Andesitas basálticas de El Morito.

El diagrama de discriminación geoquímica y ambiente tectónico de Wood (1980) (FIGURA 9), se basa en la relación de Th, Hf y Ta; las lavas de las tres unidades están en el campo de basaltos de arco volcánico, con mayor contenido de Th y menor contenido de Hf para rocas de la unidad Andesitas basálticas de El Morito. En general las muestras de las tres unidades se localizan dentro de los campos de lavas formados en arcos de margen continental activo; donde las lavas shoshoníticas tienen relaciones de Th/Ta mayores (13 a 20.5) y menores en lavas de la Formación Combia (3,5 a 9).

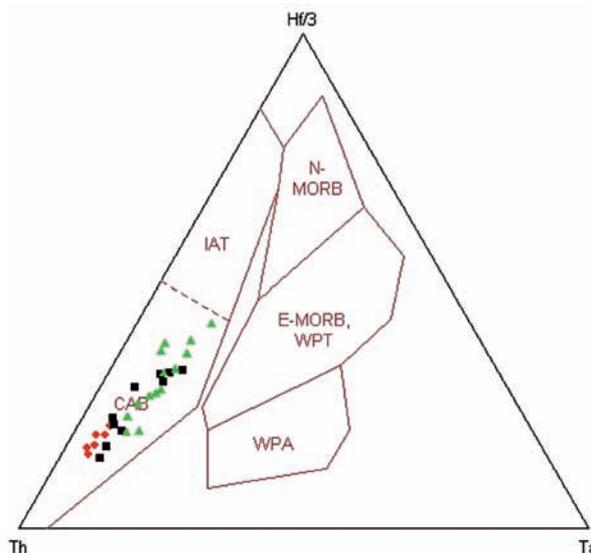


FIGURA 9. Diagrama de discriminación geoquímica y ambiente tectónico (Wood, 1980). Lavas de la Formación Combia (verde), Andesitas basálticas de El Morito (rojo) y Basaltos de El Botón (negro).

EDAD

Con relación a la edad, Ramírez *et al.* (2006) concluyeron que la Formación Combia tendría dos (2) episodios de vulcanismo explosivo: uno ocurrido a los 10 Ma, al este del río Cauca, generado por los cuerpos intrusivos que afloran en la vía Venecia – Bolombolo (9,2±1,1 Ma), coetáneo con el episodio magmático que produjo el latibasalto del Cangrejo que se localiza

dentro de la unidad que se denomina en este trabajo Andesitas basálticas de El Morito y el otro a los 6 Ma representado por los cuerpos intrusivos de Marmato, La Felisa y Támesis entre otros, que daría lugar a los piroclastos depositados al oeste del río Cauca. Si esto es cierto, estaríamos ante el hecho de encontrar productos volcánicos de dos intervalos de edades y con características geoquímicas separables dentro de lo que se ha cartografiado como Formación Combia, posibilidad que introduce nuevas ideas en una zona de interés exploratorio de mineralizaciones de Au de tipo pórfido.

Para entender el contexto regional del magmatismo Mioceno, se agrupan las edades publicadas de cuerpos que afloran en el noroccidente de Los Andes considerando su afinidad química: se separan los cuerpos de afinidad shoshonítica y los cuerpos de afinidad toleítica-calcoalcalina, como se muestra en la TABLA 4 y la FIGURA 2, con el objeto de mostrar las diferencias en edad y distribución entre cuerpos de diferente afinidad y determinar si las Andesitas basálticas de El Morito pueden hacer parte del magmatismo del Arco de El Botón o son parte del magmatismo que generó las rocas volcánicas y subvolcánicas que conforman la Formación Combia. La afinidad geoquímica se establece a partir de los trabajos de Leal (2011), Rodríguez y Zapata (2012), Zapata y Rodríguez (2011) y Ramírez *et al.* (2006), además por correlación con los resultados químicos presentados por Jaramillo (1976) y Tejada *et al.* (2007).

Al analizar los datos de la TABLA 4, se observa que las edades de los cuerpos volcánicos y plutónicos de series shoshoníticas se encuentran, la mayoría de ellos, en el rango de 9 a 12.5 Ma, incluyendo las Andesitas basálticas de El Morito; mientras lavas de la Formación Combia y cuerpos porfíricos asociados con afinidad toleítica-calcoalcalina presentan edades que están dentro del rango de 6 a 8,5 Ma. De acuerdo a los datos, el episodio más antiguo corresponde al magmatismo shoshonítico y el más reciente a la serie toleítica – calcoalcalina.

En la FIGURA 2, se muestra la distribución de edades de cuerpos miocenos en el norte de la Cordillera Occidental y Cuenca del río Cauca. Se hace la diferenciación entre edades de cuerpos shoshoníticos (negro) y edades de cuerpos toleíticos-calcoalcalinos (verde); los cuerpos shoshoníticos se distribuyen en el bloque Chocó-Panamá, Bloque Cañasgordas, zona

de sutura entre estos dos bloques y si se considera las Andesitas basálticas de El Morito y la Andesita de Buriticá como parte de este magmatismo, alcanza a llegar hasta la zona de afloramiento del Arco Barroso - Sabanalarga, mientras los cuerpos de series toleíticas – calcoalcalinas se restringen a los afloramientos de la Formación Combia en la Cuenca del río Cauca y no se extienden hacia el occidente en los bloques Cañasgordas y Chocó – Panamá.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Al analizar los resultados de la geoquímica de las unidades de edad Mioceno de la Cordillera Occidental y la cuenca del río Cauca, se concluye que hay dos series relacionadas a dos arcos separables en espacio y tiempo, uno shoshonítico que comprende unidades volcánicas como los Basaltos de El Botón y las Andesitas basálticas de El Morito, del cual hacen parte un conjunto de plutones que afloran en la Cordillera Occidental que fueron considerados parte de este arco por Zapata y Rodríguez (2011); este magmatismo tiene una edad entre 9 y 12,5 Ma.

Por otra parte, se presenta una segunda serie toleítica-calcoalcalina que comprende el vulcanismo de la Formación Combia y los cuerpos subvolcánicos porfíricos con edades entre 6 y 8,5 Ma, con una distribución restringida a la cuenca del río Cauca y la Cordillera Central. Es probable que cuerpos que se han considerado como parte del magmatismo Combia correspondan al magmatismo del Arco de El Botón, como son el cuerpo de Corcovado y un pequeño cuerpo al este de Cerro Tusa considerados más antiguos por Ramírez *et al.* (2006), con edades entre 10 y 12 Ma, esto podría ser probado con análisis geoquímicos de sus rocas.

La cartografía geológica de la Formación Combia debe ser reevaluada a la luz de la nueva información; la Formación Combia tal como hoy se presenta está agrupando cuerpos de lavas y cuerpos subvolcánicos de diferente edad y afinidad geoquímica, que probablemente pertenecen a arcos diferentes y corresponderían a dos episodios de magmatismo: el primero de ellos a la serie shoshonítica y el segundo a la serie toleítica-calcoalcalina.

El comportamiento de los óxidos mayores y elementos traza para lavas que aparecen cartografiadas como Formación Combia, corresponde a dos series: una

de ellas alcalina y de afinidad shoshonítica y la otra subalcalina con afinidad calcoalcalina media a alta en K, con valores más altos en K_2O , Na_2O , P_2O_5 para las rocas shoshoníticas, así como valores mayores en los elementos de tierras raras livianas La, Ce, Pr, Nd, Sm, Rb, Ba, Th, U, K, Sr, P, Zr, y Eu y valores menores en Ti, Y, Yb y Dy, que las lavas calcoalcalinas de la Formación Combia. Al comparar los contenidos de álcalis ($Na_2O + K_2O$) y la relación K_2O/Na_2O , las lavas shoshoníticas presentan $Na_2O+K_2O >6.6\%$, mientras las calcoalcalinas presentan valores entre 3,5% y 6,6%; las lavas shoshoníticas tienen una relación $K_2O/Na_2O >1\%$ y las calcoalcalinas menor a 1%.

Las Andesitas basálticas de El Morito presentan afinidad shoshonítica y una edad K/Ar de $9,1 \pm 0,7$ (Restrepo *et al.*, 1981), en un latibasalto colectado en la quebrada El Cangrejo, edad que permite separar esta unidad de las lavas toleíticas-calcoalcalinas que conforman la Formación Combia y que han dado edades entre 6 a 8,5 Ma. Las lavas shoshoníticas de las Andesitas basálticas de El Morito se restringen a la parte norte de afloramientos de la Formación Combia, en la cuenca del río Cauca en Antioquia, localizadas entre las coordenadas X: 1.169.000 a X:1.180.000 y Y:1.1320.000 a Y:1.1370.000, ocupando un área aproximada de 50 km². Hacia el sur predominan las lavas y rocas piroclásticas de afinidad calcoalcalina, aunque de acuerdo a los datos de Leal (2011), en los alrededores de Jericó también se presentan lavas shoshoníticas sugiriendo que pueden presentarse otros cuerpos shoshoníticos dentro de lo que ha sido cartografiado como Formación Combia (FIGURA 4).

Las lavas de las unidades Basaltos de El Botón y Andesitas basálticas de El Morito presentan las mismas edades y similar composición geoquímica de óxidos mayores, elementos trazas y tierras raras, resultados que sugieren un desarrollo a partir del mismo arco, el Arco de El Botón, donde los Basaltos de El Botón se derramaron en el límite de colisión entre el bloque conformado por el Arco Chocó-Panamá y el Bloque Cañasgordas, y las Andesitas basálticas de El Morito se derramaron en el límite de colisión entre el Bloque Cañasgordas y el Basamento metamórfico de la Cordillera Central.

El Arco shoshonítico de El Botón se extiende desde el Bloque Chocó – Panamá y dio origen a lavas en la zona de colisión Arco Chocó-Panamá - Bloque Cañasgordas,

además, generó plutones que intruyeron los bloques Chocó-Panamá y Cañasgordas y alcanzó la zona de colisión entre el Bloque Cañasgordas y el basamento metamórfico de la Cordillera Central, derramando en esta zona las lavas de El Morito. El arco calcoalcalino que dio origen a la Formación Combia se desarrolló en la zona de colisión entre el Bloque Cañasgordas y el basamento metamórfico de la Cordillera Central y probablemente se extiende hasta el flanco oriental de la Cordillera Central.

Las lavas de la Formación Combia, de afinidad calcoalcalina, son más jóvenes que aquellas generadas por el Arco de El Botón, como muestran las edades obtenidas en los cuerpos hipoabisales andesíticos y dacíticos y en lavas que afloran en la parte norte del río Cauca (Leal, 2011; González, 1980 y 2010; Restrepo *et al.*, 1981; Ramírez *et al.*, 2006; Toro *et al.*, 1999). Los pórfidos y lavas de la Formación Combia representan un evento magmático calcoalcalino posterior al evento de El Arco de El Botón. Los datos sugieren un evento magmático de arco shoshonítico (9 y 12,5 Ma) que antecedió al vulcanismo de arco de afinidad toleítica-calcoalcalina medio a alto en K (6 y 8,5 Ma).

Es poco probable que los cuerpos shoshoníticos que se generan en la parte más distal y profunda de la zona de Benioff, dentro de un ambiente de arco (Ringwood, 1974) tengan relación con las rocas toleíticas-calcoalcalinas de la Formación Combia y cuerpos porfiríticos relacionados, que se habrían generado en un arco más cercano a la fosa; ambas series presentan diferente distribución espacial.

Además, pensar que el arco shoshonítico evolucionó a un arco posterior calcoalcalino-toleítico no está acorde con los modelos de evolución y generación de arcos, donde éstos inician con productos toleíticos más proximales a la fosa, seguidos por calcoalcalinos y finaliza en shoshoníticos más distales, profundos y jóvenes (Ringwood, 1974).

En la FIGURA 10 se muestra el modelo para el arco shoshonítico de El Botón modificado de Rodríguez y Zapata (2012); El modelo para el arco que generó las lavas y cuerpos porfiríticos relacionados de la Formación Combia deberá analizarse en un contexto más regional que determine la distribución de cuerpos relacionados a este último arco.

TABLA 4. Edades en cuerpos miocenos que afloran en la parte norte de La Cordillera Occidental y cuenca del río Cauca.

MUESTRA	X	Y	MÉTODO	ROCA	WMPA (Ma) \pm 1s	UNIDAD LITOLÓGICA	REFERENCIA
EDADES CUERPOS DE AFINIDAD SHOSHONÍTICA							
706421	1101201	1233067	Ar-Ar, Bt	Diorita piroxénica	10.17 \pm 0.41	Gabro de Cerro Frontino	Rodríguez y Bermudez, (imprensa)
706423	1101549	1232530	Ar-Ar, Bt	piroxenita biotítica	9.87 \pm 0.18	Gabro de Cerro Frontino	Rodríguez y Bermudez, (imprensa)
706475	1101171	1132457	Ar-Ar, RT	Cornubianita	12,2 \pm 4,6	Skarn de Cerro Frontino	Rodríguez y Bermudez, (imprensa)
706463	1104374	1200239	Ar-Ar, Bt	Monzodiorita	10.44 \pm 0.23	Monzonita del Páramo de Frontino	Rodríguez y Zapata (2012)
706406	1085888	1267521	Ar-Ar, RT	Basalto	10.55 \pm 0.28	Cuerpo de gabro	Zapata y Rodríguez (2011)
706402	1091777	1256667	Ar-Ar, RT	Basalto	11.0 \pm 0.3	Basaltos de El Botón	Zapata y Rodríguez (2011)
706762	1080331	1237031	Ar-Ar, Bt	Monzodiorita	11.9 \pm 0.5	Monzodiorita de Carauta	Buchely <i>et al.</i> (2009)
706781	1073398	1241262	Ar-Ar, Pl-Cpx	Andesita	9.0 \pm 1.7	Roca de Dique	Buchely <i>et al.</i> (2009)
706724	1115835	1117336	Ar-Ar, Bt-Hbl	Monzodiorita	11.9 \pm 0.6	Cuarzomonzonita de Farallones	Arboleda <i>et al.</i> (2009)
706727	1115262	1120120	Ar-Ar, Bt-Hbl	Monzodiorita	9.8 \pm 0.2	Cuarzomonzonita de Farallones	Arboleda <i>et al.</i> (2009)
706936	1057698	1193287	Ar-Ar, Hbl	Gabro	12.3 \pm 0.4	Int. Máficos menores	Buchely <i>et al.</i> (2009)
UMN 2978	1136571	1177732	K-Ar, RT	Latibasalto	9,1 \pm 0,7	Andesita basáltica de El Morito	Restrepo <i>et al.</i> (1981)
UNM-3059	1093669	1260990	K-Ar, RT	Latibasalto	9,3 \pm 0,8	Basalto de El Botón	Restrepo <i>et al.</i> (1979)
IGM-119167	1115143	1115522	K-Ar, Hbl	Tonalita	11 \pm 2	Cuarzomonzonita de Farallones	Calle <i>et al.</i> (1980)
M-15			TRZ-F	Gabro	16.7	Monzonita de Cerro Frontino	Restrepo (1991)
A-2527	1101846	1201501	K-AR	Monzonita	10,9 \pm 3,3	Monzonita del Páramo de Frontino	Botero (1975)
Burítica-1	1129240	1232760	K-AR, Bt	Diorita	11.8 \pm 0.4	Andesita de Burítica	Leal (2011)
x	1115133	1115530	K-Ar, HO		11	Cuarzomonzonita de Farallones	Calle <i>et al.</i> (1980)
y	1101846	1201501	FT, MO		11	Monzonita de Cerro Frontino	Kroonenberg <i>et al.</i> (1990)
San Diego-1	1101463	1232593	K/Ar, Bt	Diorita	11.8 \pm 0.4	Gabro de Cerro Frontino	Leal (2011)
706475	1101171	1132457	Ar-Ar, Hbl	Cornubianita de diópsido y granate	12 \pm 1.1	Aureola de contacto Cerro Frontino	Rodríguez y Bermudez, (imprensa)
EDADES CUERPOS DE AFINIDAD TOLEÍTICA CALCOALCALINA - RELACIONADOS A LA FM COMBIA							
TM-2	1111798	1153030	K-Ar BT	Granodiorita	7,8 \pm 0,4	Stock de Támesis	Leal (2011)
TM-3	1116384	1151089	K-Ar,RT	Andesita	6,1 \pm 1	Formación Combia	Leal (2011)
Q-39	1077521	1151251	K-Ar, RT, Bt	Pórfido diorítico	8,2 \pm 0,7		Leal (2011)
Q-45	1079040	1151651	Re-Os,Mo	Pórfido diorítico	7,7 \pm 0,2		Leal (2011)
WR-69	1162913	1142081	U-Pb , Zr	Pórfido diorítico	7,6 \pm 0,3	Intrusivos hipoabisales miocenos	Leal (2011)
MIN-01	1146829	1149111	U-Pb , Zr	Pórfido diorítico	7,6 \pm 0,2	Intrusivos hipoabisales miocenos	Leal (2011)
Aurora-IM-01	1128404	1149897	U-Pb , Zr	Pórfido diorítico	8 \pm 0,9	Intrusivos hipoabisales miocenos	Leal (2011)
WR-234	1112638	1149451	U-Pb , Zr	Granodiorita	7,2 \pm 0,2	Stock de Támesis	Leal (2011)

MUESTRA	X	Y	MÉTODO	ROCA	WMPA (Ma) \pm 1s	UNIDAD LITOLÓGICA	REFERENCIA
Q-34	1079008	1151325	U-Pb , Zr	Pórfido diorítico	8 \pm 0,5	Intrusivos hipoabisales miocenos	Leal (2011)
IGM-95353	1086921	1160451	K-Ar BT	Pórfido Andesítico	6,8 \pm 0,2	Stock de La Felisa	González (1980)
IGM-95353	1086921	1160451	K-Ar, Hbl	Pórfido Andesítico	7,1 \pm 0,2	Stock de La Felisa	González (1980)
P18	1161692	1146179	K-Ar,RT	Andesita	8,0 \pm 0,9	Pórfido de Titiribí	MacDonald (1980)
P18	1161692	1146179	K-Ar,RT	Andesita	7,8 \pm 1	Pórfido de Titiribí	MacDonald (1980)
IGM-6881	1099095	1162885	K-Ar, Hbl	Pórfido dacítico	6,3 \pm 0,7	Stock de Marmato	Restrepo et al. (1981)
UNM 2947	1122052	1162445	K-Ar, Hbl	Andesita porfirítica	8 \pm 4	Pórfido de La Pintada	Restrepo et al. (1981)
G.T	1071939	1158153	Huellas Zr	Pómez andesíticas	6,2 \pm 0,3	Formación Irra	Toro et al. (1999)
A.A	1071939	1158153	Huellas Zr	Pómez andesíticas	6,3 \pm 0,3	Formación Irra	Toro et al. (1999)
JR136R	1111946	1151592	Ar-Ar,Bt	Cuarzodiorita Hbl	7,68 \pm 0,23	Stock de Támesis	González (2010)
JR136R	1111946	1151592	Ar-Ar,Bt	Cuarzodiorita Hbl	7,8 \pm 0,44	Stock de Támesis	González (2010)
JR136R	1111946	1151592	Ar-Ar,Bt	Cuarzodiorita Hbl	7,54 \pm 0,36	Stock de Támesis	González (2010)
JR136R	1111946	1151592	Ar-Ar, Hbl	Cuarzodiorita Hbl	7,86 \pm 0,51	Stock de Támesis	González (2010)
JR136R	1111946	1151592	Ar-Ar, Hbl	Cuarzodiorita Hbl	7,7 \pm 0,79	Stock de Támesis	González (2010)
JR136R	1111946	1151592	Ar-Ar, Hbl	Cuarzodiorita Hbl	7,8 \pm 0,77	Stock de Támesis	González (2010)
SR033R	1083771	1161842	Ar-Ar, Hbl	Andesita Hbl	6,84 \pm 0,2	Pórfido de Irra	González (2010)
SR033R	1083771	1161842	Ar-Ar, Hbl	Andesita Hbl	6,77 \pm 0,22	Pórfido de Irra	González (2010)
SR033R	1083771	1161842	Ar-Ar, Hbl	Andesita Hbl	6,89 \pm 0,27	Pórfido de Irra	González (2010)
CGP29	1145870	1132392	Huellas Zr		10,2 \pm 0,17	Formación Combia	Ramírez et al. (2006)
CGP29	1145870	1132392	Huellas Zr		5,72 \pm 0,3	Formación Combia	Ramírez et al. (2006)
CGP29	1145870	1132392	Huellas Zr		11,6 \pm 1,35	Formación Combia	Ramírez et al. (2006)
CGP29	1145870	1132392	Huellas Zr		6,82 \pm 0,5	Formación Combia	Ramírez et al. (2006)
CGP15	1145870	1132392	Huellas Zr		7,97 \pm 0,85	Formación Combia	Ramírez et al. (2006)
CGP15	1145870	1132392	Huellas Zr		6 \pm 0,34	Formación Combia	Ramírez et al. (2006)
CGP15	1145870	1132392	Huellas Zr		9,4 \pm 1,13	Formación Combia	Ramírez et al. (2006)
CGP15	1145870	1132392	Huellas Zr		6,81 \pm 0,47	Formación Combia	Ramírez et al. (2006)
CJ-61	1083694	1161629	Ar-Ar,Bt	Pórfido Andesítico	6,75 \pm 0,06	Porfido Andesítico	Ramírez et al. (2006)
CJ-61	1083694	1161629	Ar-Ar,Bt	Pórfido Andesítico	7,36 \pm 0,14	Porfido Andesítico	Ramírez et al. (2006)
CJ-61	1083694	1161629	Ar-Ar,Bt	Pórfido Andesítico	6,7 \pm 0,05	Porfido Andesítico	Ramírez et al. (2006)
CJ-61	1083694	1161629	Ar-Ar,Bt	Pórfido Andesítico	6,81 \pm 0,04	Porfido Andesítico	Ramírez et al. (2006)
SG-008	1120977	1149914	Huellas Ap		6,16-1,83/+2,6	Stock de Támesis	ANH - U de Caldas (2011)
SG-008	1120977	1149914	Huellas Zr		6,55-1,11/+1,33	Stock de Támesis	ANH - U de Caldas (2011)

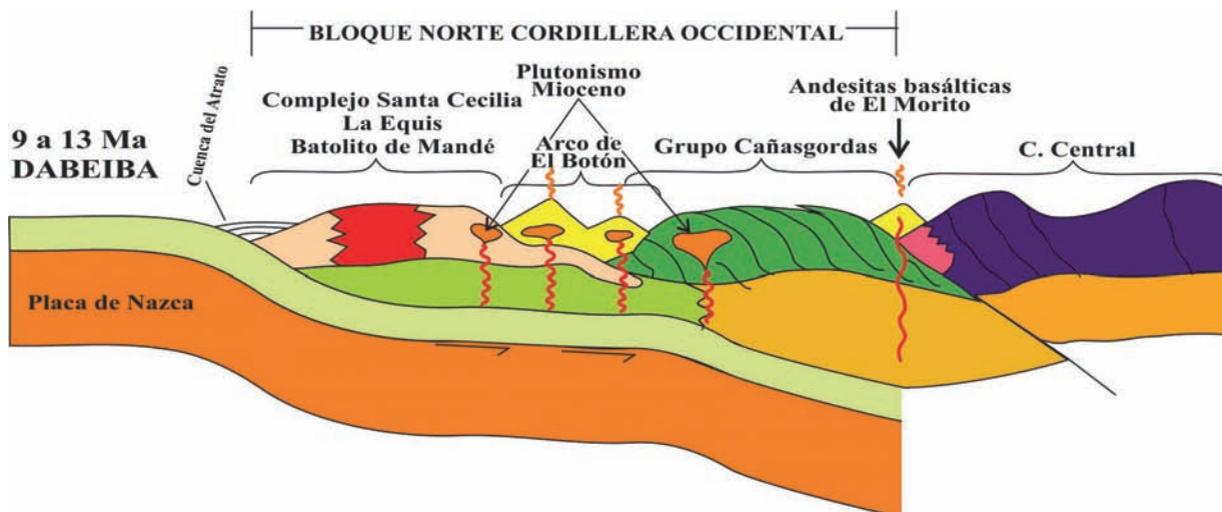


FIGURA 10. Modelo evolutivo del Arco de El Botón (Modificado de Rodríguez y Zapata, 2012).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Servicio Geológico Colombiano por el apoyo prestado para desarrollar el trabajo de campo y laboratorio, así como el suministro de datos analíticos; a los revisores del artículo por las valiosas observaciones y correcciones que permitieron mejorar el texto final.

REFERENCIAS

Álvarez, E., y González H. 1978. Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7 (Urrao). Ingeominas. Medellín, Informe 1761. 347p.

Álvarez, J.A. 1971. Informe preliminar sobre geoquímica de la Cordillera Occidental. INGEOMINAS, Medellín, Informe interno, 8p. Inédito.

ANH-Universidad de Caldas. 2011., Estudio geológico integrado en la Cuenca Tumaco onshore. Síntesis cartográfica, sísmica y análisis bioestratigráfico, petrográfico, geocronológico, termocronológico y geoquímico de testigos de perforación y muestras de superficie. Informe contrato 092. Inédito.

Arboleda, G., Celada, C., Forero, S., Montealegre, V., Padilla, J.C., Carmona, J., y Medina, E. (UTAGS-GE). 2009. Cartografía Geológica y muestreo geoquímico en la parte norte de la Cordillera Occidental, planchas 165 y 185 (396 km²) Contrato No. 392 de 2007 INGEOMINAS-UTAGS-GE. Bogotá. 178 p.

Buchely, F., Parra, E., Castillo, H., González, F., Dávila, C., y Romero, O. 2009. Realización de la cartografía geológica y muestreo geoquímico en las planchas 144,

145, 128, 129, 113 y 114 (1580 km). Contrato No. 390 de 2007 INGEOMINAS-GRP Ltda. Bogotá. 172p.

Calle, B., Toussaint, J.F., Restrepo, J.J., y Linares, E. 1980. Edades K/Ar de dos plutones de la parte septentrional de la Cordillera Occidental de Colombia. Geología Norandina, 2: 17- 20.

Calle, B., y Salinas, R. 1986. Geología y Geoquímica de la Plancha 165 Carmen de Atrato. INGEOMINAS, Bogotá, Informe 1967, 140p.

Geoestudios-INGEOMINAS. 2005. Complementación geológica, geoquímica y geofísica de la parte occidental de las planchas 130 Santa Fe de Antioquia y 146 Medellín Occidental.

González, H. 1980. Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 168 (Salamina). Boletín Geológico, 23: 174 p.

González, H. 2001. Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS, Bogotá. 240p

González, H. 2010. Geoquímica, Geocronología de las unidades litológicas asociadas al sistema de fallas Cauca-Romeral, sector centro-sur. Tomo I, INGEOMINAS, Medellín.

Grosse, E. 1926. Estudio Geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia. Berlín, Verlag Von Dietrich Reimer (Ernst Vohsen), 361p.

- Jaramillo, J.M. 1976. Volcanic rocks of the Río Cauca valley, Colombia S.A. Thesis Degree of Master of Arts, Rice University, Houston.
- Leal, H. 2011. Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: a tectonomagmatic approach. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona. 989p. Inédita.
- Le Bas, M.I., Le Maitre R.W., Streckeisen, A., and Zanetin, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27 (3): 563-586.
- Le Maitre, R. W. (ed.). 2002. *Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*, 2nd ed. XVI. Cambridge University Press. New York, 236p.
- López, A., Sierra, G., y Ramirez, D. 2006. Vulcanismo Neógeno en el suroccidente antioqueño y sus implicaciones tectónicas. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 19: 26-41.
- MacDonald, W. 1980. Anomalous paleomagnetic directions in late Tertiary andesitic intrusions of the Cauca Depression, Colombian Andes. *Tectonophysics*, 68:339-348.
- Marriner, G.F., and Millward, D. 1984. Petrochemistry of Cretaceous to recent Vulcanism in Colombia. *Journal of Geological society of London*, 141:473-486.
- Maya, M., y González, H. 1995. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico, INGEOMINAS*, 35(2,3) :43-57.
- Nakamura, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 38: 757-775.
- Pearce, J.A. 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks; Applications for massive Sulphide Exploration, (Wyman, D.A. Ed). Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12: 79-113.
- Peccerillo, A., and Taylor, S.R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonir area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58 : 63-81.
- Kroonenberg, S., Bakker, J.G. M., and Van Der Wiel, A.M. 1990. Late Cenozoic Uplift and Paleogeography of the Colombian Andes: Constraints for the evolution of high-Andean biota. *Geologie en Mijnbouw*, 69: 279-290.
- Radelli, L. 1967. Géologie des Andes Colombiennes. Travaux deu laboratorio de Géologie de la Faculté des sciences de Grenoble. *Memories*, 6 : 456p.
- Ramírez, D.A., López, A., Sierra, G.M., y Toro, G.E. 2006. Edad y proveniencia de las rocas volcánico sedimentarias de la Formación Combia en el Suroccidente Antioqueño Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 19: 9-26.
- Restrepo, J.J., Toussaint, J.F., y González, H. 1981. Edades miopliocenas del magmatismo asociado a la Formación Combia, departamentos de Antioquia y Caldas. *Geología Norandina*, (3): 21-26.
- Restrepo, J.J., Toussaint, J.F., Zuluaga, J., y Hoyos, P. 1979. Algunas consideraciones sobre la geología de la parte septentrional de la Cordillera Occidental. *U.Nal., Publ. Esp. Geol.*, 20:1-26.
- Ringwood, A. E. 1974. The petrological evolution of island arcsystems. *Journal of Geological Society of London*, 130: 183-204.
- Rodríguez, G., y Arango, M.I. 2013. Formación Barroso: arco volcánico toleítico y Diabasas de San José de Urama: un prisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la Cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 33: 17-38.
- Rodríguez, G., y Zapata, G. 2012. Características del plutonismo Mioceno superior en el segmento norte de la Cordillera Occidental e implicaciones tectónicas en el modelo geológico del noroccidente colombiano. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 31: 5-22.
- Rodríguez, G., y Zapata, G. 2013. Análisis comparativo entre la Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande: un arco volcánico toleítico-calcoalcalino, segmentado por el Sistema de Fallas de Romeral en Los Andes del Norte? *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 33:39-57.
- Rodríguez, G., Zapata, G., y Gómez, J.F. 2010. Geología de la parte oriental de la Plancha 114 Dabeiba. *INGEOMINAS. Medellín*. 172p.
- Rodríguez, G, Arango, M.I., y Bermúdez, J.G. 2012. Batolito de Sabanalarga, Plutonismo de arco en la zona de sutura entre las cortezas oceánica y continental de los Andes del Norte. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 32: 81-98.

Rodríguez, G., y Bermúdez, J.G. (En imprenta). Petrografía, geoquímica y edad del Gabro de Cerro Frontino. Boletín de Ciencias de La Tierra.

Sun, S.S., and McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., and Norry, M.J. (Eds.) Magmatism in ocean basins, Geological Society Special Publication, 42 : 313-345.

Tejada, M., Betancourt, J., Nivia, A., Weber, M., and Gómez, J. 2007. Cartografía geológica y caracterización geoquímica de la Formación Combia en los alrededores de Jericó y Pueblorrico, Departamento de Antioquia – Colombia. Memorias XI Congreso Colombiano de geología. Bucaramanga.

Toro, G., Restrepo, J.J., Poupeau, G., Saenz, E., y Azdimousa, A. 1999. Datación por trazas de fisión de circones rosados asociados a la secuencia volcano sedimentaria de Irra (Caldas). Boletín de Ciencias de la Tierra, 13: 28-34.

Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., and Beltrán, A. 2011. Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. Lithos, 125: 875-896.

Wood, D.A. 1980. The application of Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and establishing the nature of crystal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. Earth and Planetary Science Letters, 50: 11-30.

Zapata, G., y Rodríguez G. 2011. Basalto de El Botón, volcanismo mioceno de afinidad shoshonítica en el noreste de la Cordillera Occidental de Colombia. Boletín de Ciencias de La Tierra, 30: 77-91.

Zuluaga, J.E., y Hoyos, P. 1978. Estudio geológico del Grupo Cañasgordas: Sección Boquerón del Toyo-Dabeiba. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Tesis de grado, 147p.

Trabajo recibido: diciembre 13 de 2013

Trabajo aceptado: marzo 31 de 2014